

IMPACTS DES REJETS INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DU MILIEU ET SUR LES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE. CAS DE LA RÉGION D'ANNABA (ALGÉRIE).

Saadane DJORFI*, Azzedine HANI*, Rabah LAOUAR* et Larbi DJABRI*

RÉSUMÉ

L'important développement industriel dans la région d'Annaba (NE de l'Algérie) s'est traduit par un accroissement des rejets induisant une dégradation de l'environnement et de la qualité des eaux de l'aquifère. L'analyse statistique des données acquises et la modélisation du transport de polluant ont permis d'élaborer le schéma conceptuel du site contaminé et d'identifier les différents scénarios d'exposition.

Les résultats obtenus montrent que les milieux récepteurs (humain, faune, écosystème de l'oued) sont touchés par les mécanismes primaires et secondaires de transport de polluants. Les voies d'exposition sont l'inhalation des substances volatiles et du contact direct avec le sol (ingestion et contact cutané) qui peuvent menacer les populations et la faune environnante. Par ailleurs, les eaux souterraines présentent également un risque potentiel particulièrement pour l'écosystème des oueds Meboudja, Seybouse, la mer méditerranée et pour les captages d'eau (irrigation et alimentation du bétail).

Mots clés - Pollution - Chrome - Rejets industriels - Modélisation numérique - Annaba (Algérie).

IMPACTS OF INDUSTRIAL WASTES ON THE ENVIRONMENT AND THE WATER TABLE AQUIFER QUALITY IN THE ANNABA REGION (ALGERIA).

ABSTRACT

The continuous increase of industrial activities in the Annaba region (NE of Algeria) resulted in an increase of waste disposal inducing environmental pollution and contamination of groundwater. The available data on soil and groundwater contamination was used to develop a conceptual model for the contaminated regions and to identify the exposure scenarios to pollution. The obtained results highlight that the receptor (humans, wildlife, ecosystem) were linked to primary and secondary transport mechanisms. The considered exposure pathways were the inhalation of volatile substances and the direct contact with soil (ingestion and dermal contact) that could threaten either humans or wildlife, both on-site and off-site. In addition, groundwater is considered to be a potential risk pathway, especially for the Oued Meboudja, the Seybouse River and Mediterranean Sea ecosystems and also for the use of alluvial aquifer.

Keywords: Pollution - Chromium - Industrial wastes - Digital modelling - Annaba (Algeria).

*Département de Géologie, Faculté des Sciences de la Terre, Université Badji Mokhtar Annaba, BP. 12, 23000 Annaba, Algérie. e-mail djorfi2001@yahoo.fr

- Manuscrit déposé le 26 Novembre 2005, accepté après révision le 06 Juin 2007.

I. INTRODUCTION

L'accroissement des déchets solides et liquides est étroitement lié au développement économique et à la démographie. En effet, ce développement entraîne des impacts négatifs sur l'environnement et l'économie de beaucoup de pays. L'accroissement des populations et l'intensification des activités économiques en Algérie sont accompagnés d'une augmentation des rejets de toute nature (Debièche, 2002; Hani, 2003; Djabri *et al.*, 2003) qui vont rejoindre directement le milieu récepteur sans aucun traitement préalable ou du moins, sans réduire les quantités de polluants selon les normes admises. Cette situation commence à avoir des répercussions très négatives sur la santé publique, sur les écosystèmes et sur l'économie elle-même.

Actuellement, les effluents industriels, situés dans la région d'étude, contiennent d'importantes quantités de produits chimiques organiques et inorganiques et autres substances polluantes. La plupart des industries ne sont pas raccordées à un quelconque réseau d'assainissement et même s'il existe, ce dernier ne fonctionne pas d'une manière appropriée. Par conséquent, les effluents chimiques fortement colorés et toxiques rejoignent l'oued Meboudja, un affluent de l'oued Seybouse, polluant de ce fait les eaux de surface et les eaux souterraines. Autour de l'oued Meboudja, le degré de contamination a été si intense que dans certains secteurs, notamment au niveau de la confluence oued Meboudja-oued Seybouse, l'environnement est devenu agressif pour la santé humaine et pour la faune et la flore. Autrefois, la région avait une vocation agricole et jusqu'à l'an 2000 aucune des unités industrielles n'a pris de disposition pour réduire les effluents industriels. Le sol était considéré comme un milieu apte à absorber toutes sortes de produits (métaux lourds, déchets) sans qu'il n'y ait aucune altération de son fonctionnement normal. Aujourd'hui, les teneurs en éléments toxiques dans le sol, l'eau et l'air dépassent largement les limites autorisées (US EPA, 1989).

La production agricole a diminué considérablement et la vie aquatique dans l'oued Seybouse, devenu fortement pollué, a disparu.

L'objectif de cette étude est de déterminer l'impact des effluents solides et liquides du complexe sidérurgique « Mittal steel » sur la qualité du milieu et sur les eaux souterraines. Pour se faire, les résultats des analyses physico-chimiques, effectuées sur les échantillons de sol et des eaux de surface et souterraines durant la période 1999-2005, ont été utilisés. Les informations acquises sur la contamination des sols et des eaux superficielles et souterraines ont été utilisées pour élaborer le schéma conceptuel du site contaminé et pour identifier les différents scénarios d'exposition.

II. APERÇUS GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le secteur étudié fait partie de la basse plaine de la Seybouse (NE Algérie), dans le sous bassin de l'oued Meboudja (fig. 1), et il appartient au système aquifère de la région d'Annaba. Sur la bordure ouest de ce secteur, les terrains métamorphiques du massif de l'Edough sont composés de roches gneissiques d'âge néo-protérozoïque à la base, de micaschistes à grenats, disthène, sillimanite et andalousite avec des niveaux de marbres (série intermédiaire) et des séricitoschistes, chloritoschistes et graphitoschistes d'âge paléozoïque au sommet (Hilly, 1962; Ilavsky et Snopkova, 1987; Gleizes *et al.*, 1988; Brunnel *et al.*, 1988; Hammor et Lancelot, 1998; Ahmed-Said *et al.*, 1993; Laouar *et al.*, 2002). Au sud, affleurent les alluvions de haut niveau du lac Fetzara et à l'est c'est l'oued Seybouse qui parcourt la plaine d'Annaba du sud vers la Méditerranée. La chaîne numidienne des monts de la Cheffia, de direction SW-NE, borde au sud la plaine. Au niveau du secteur d'étude, les sédiments mio-plio-quatérnaires sont venus combler une zone d'effondrement comportant deux fosses séparées par un haut fond qui porte la butte de Daroussa (Djabri *et al.*, 2003).

IMPACTS DES REJETS INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DU MILIEU ET SUR LES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE.
CAS DE LA RÉGION D'ANNABA (ALGÉRIE)

L'oued Meboudja est caractérisé par un écoulement permanent en hiver. Son alimentation est assurée par les eaux de pluie où les précipitations moyennes annuelles s'élèvent à 650 mm, et du drainage du lac Fetzara. Son débit peut atteindre alors $16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. En été, les apports sont constitués

principalement par les sorties du lac (le débit oscille entre 1 et $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). L'oued reçoit également sur son parcours les rejets urbains (ex: villages de Hadjar Diss, Sidi Amar, El-Hadjar) et industriels (ex: usine sidérurgique « Mittal steel, zone industrielle de Chaiba, Pont Bouchet).

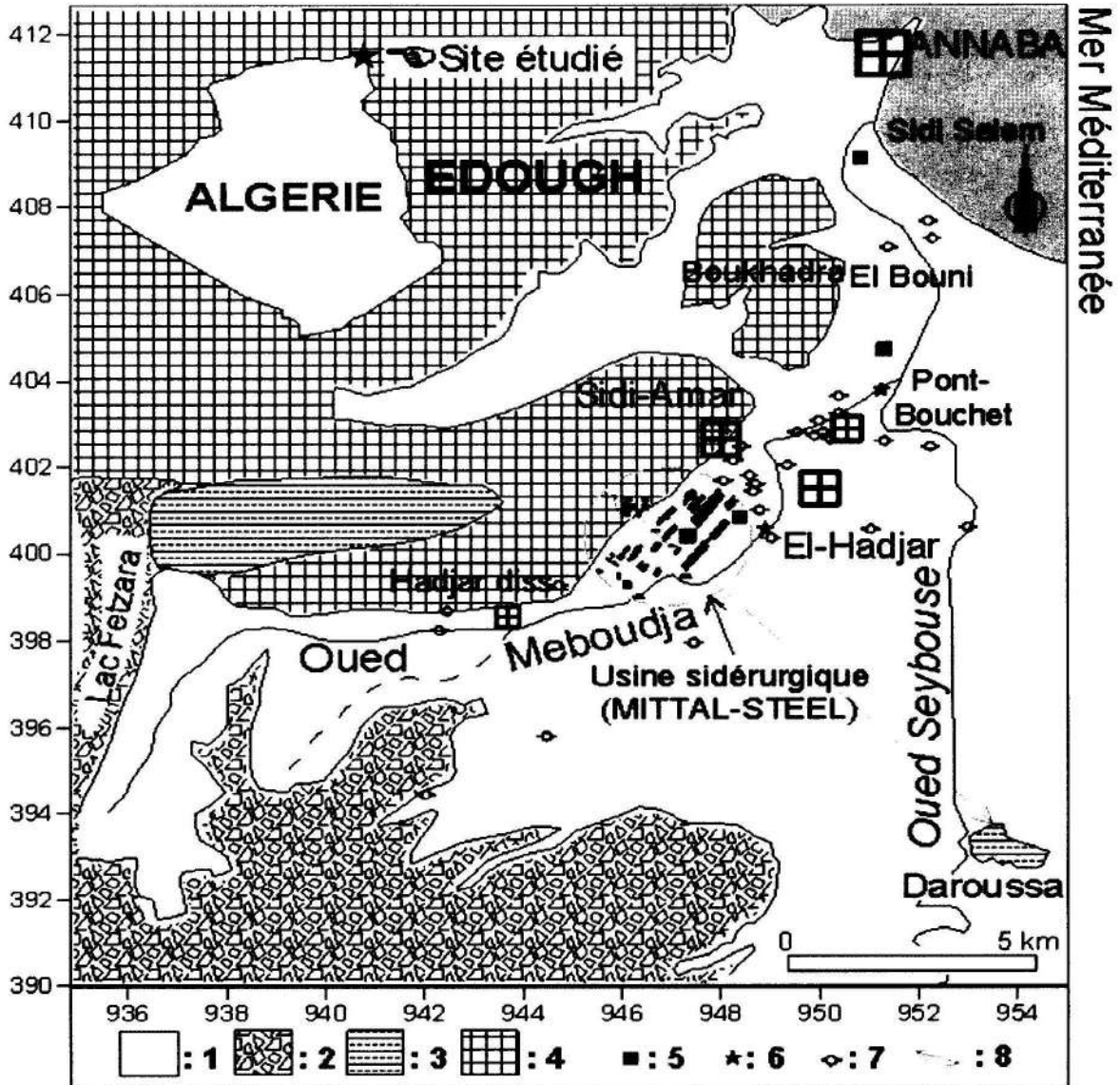


Fig. 1 - Situation et esquisse géologique de la zone d'étude.

Geological sketch map of the studied area.

1 : Quaternaire indifférencié (*Undifferentiated Quaternary sediments*); 2 : Alluvions anciennes (*Ancient alluvium*); 3 : Grès et argiles du Numidien (*Numidian sandstone and clay*); 4 : Formations métamorphiques (*metamorphic formation*); 5 : Sol échantillonné (*Sample location (soil)*); 6 : Eau de surface échantillonnée (*Sample location (surface water)*); 7 : Puits échantillonné (*Sample location (well)*); 8 : Coupe (*Cross-section location*).

La région renferme dans son sous-sol un réservoir aquifère composé de formations alluvionnaires avec 70% de sables et 30% d'argiles (Zenati, 1999) (fig. 2). La perméabilité moyenne varie entre 10^{-3} et 10^{-4} m.s⁻¹. L'infiltration efficace s'élève à 15% des précipitations, correspondant à une lame d'eau infiltrée de 100 mm/an. (Debièche, 2002 ; Hani, 2003; Hani et al., 2003).

III. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les nombreux travaux, réalisés dans la région (Kherici, 1993; Louhi, 1997; Djabri, 1996; Toubal, 1998; Debièche, 2002; Hani, 2003; Djabri et al., 2003) ont permis de suivre l'évolution des niveaux piézométriques de la nappe et de surveiller la qualité des sols et des eaux.

Pour estimer la concentration d'exposition dans le cadre de l'évaluation détaillée des risques sur la santé humaine, un nombre d'analyses chimiques du sol a été entrepris. Les prélèvements du sol ont été effectués sur plusieurs points de la plaine d'Annaba en tenant compte de la localisation par rapport à la source potentielle de pollution, de la végétation, etc. L'échantillonnage et le dosage ont été effectués selon les protocoles décrits par AFNOR (2005) et J. Rodier (1996).

Les mesures et les prélèvements effectués sur les eaux superficielles et souterraines ont touché près de 30 puits (fig. 1), utilisés généralement pour l'alimentation du bétail et pour l'irrigation. La température (T), la conductivité électrique (CE) et le pH ont été mesurés *in situ* en utilisant un multi-

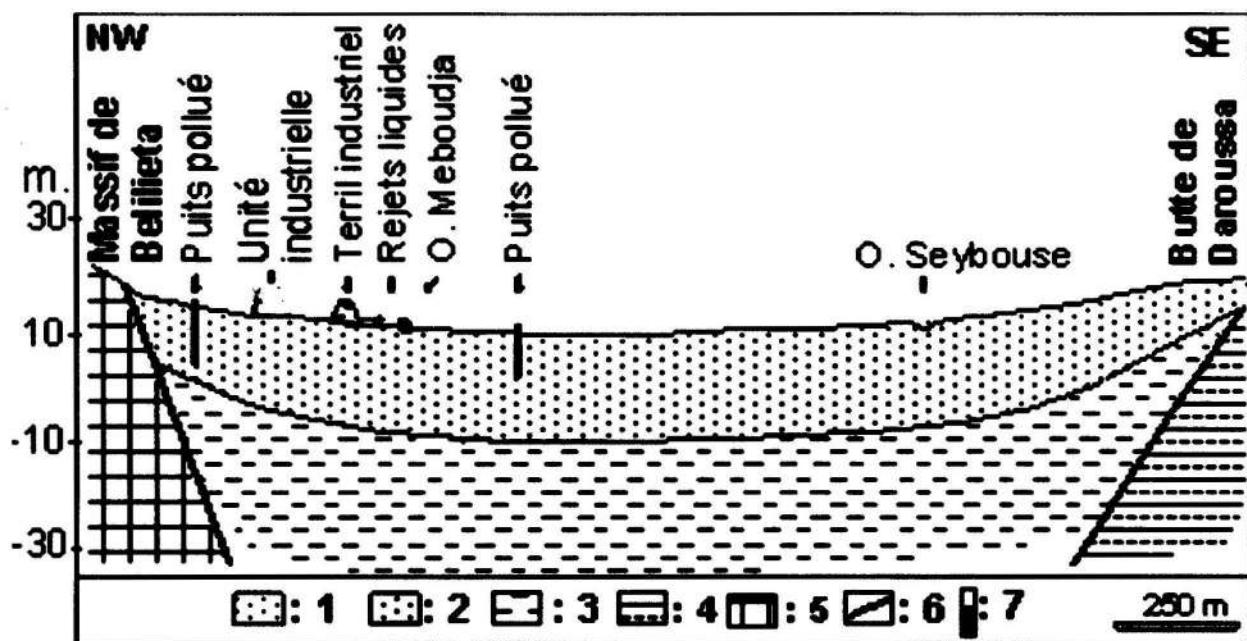


Fig. 2 - Coupe hydrogéologique au travers des alluvions de la basse Seybouse.

Hydrogeological cross-section through alluvium of the Seybouse River.

1 : Formations aquifères (alluvions, sables, limons et argiles) (*Aquifer formations (alluvium, sand, silt and clays)*);
 2 : Argiles mio-plio-quaternaires (*Mio-plio-quaternary clays*); 3 : Grès et argiles numidiens (*Numidian sandstones and clay*); 4 : Formations métamorphiques (*Metamorphic formations*); 5 : Failles (*Faults*); 6 : Puits (*Well*); 7 : Niveau piézométrique (*Water level*).

IMPACTS DES REJETS INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DU MILIEU ET SUR LES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE.
CAS DE LA RÉGION D'ANNABA (ALGÉRIE)

paramètre WTW (multiligne P3 PH/LF-SET) et un Oxymètre (WTW) avec une sonde (CelloX 325) pour la mesure de l'oxygène dissous. L'analyse des éléments chimiques s'est effectuée selon deux méthodes : l'absorption atomique à flamme (Perkin-Elmer 1100) pour le dosage des cations majeurs et le spectrophotomètre Photolab Spektral de marque WTW pour l'analyse des anions et des éléments en traces.

Le dépouillement et l'analyse des données géologiques (coupes de forage) et hydrodynamiques (pompages d'essai et piézométrie) permettent d'élaborer le schéma conceptuel

pour aborder la modélisation hydrodynamique et le transport de masse.

IV. RÉSULTATS, ANALYSE ET INTERPRÉTATION

Au niveau du sol, des analyses chimiques ont été effectuées sur quatre sites alignés selon une direction S-N: les deux premiers à proximité des terrils du complexe sidérurgique, le troisième à El-Bouni et le quatrième en bordure de mer. Les résultats obtenus montrent une décroissance assez nette des valeurs du chrome qui passent de 0,59 à 0,34 mg/l du sud vers le nord (tableau I et fig. 3).

Tableau I - Résultats analytiques de l'échantillonnage des sols en ppm.

Analytical results of soil in ppm.

Echantillons	Intensité émise moyenne	Concentration obtenue (ppm)	Ecart-type	incertitude
B1	970,25	0,540	0,013	0,020
B2	1002,25	0,587	0,006	0,009
B3	829,00	0,331	0,007	0,011
B4	869,00	0,390	0,009	0,014
B5	922,00	0,468	0,006	0,009

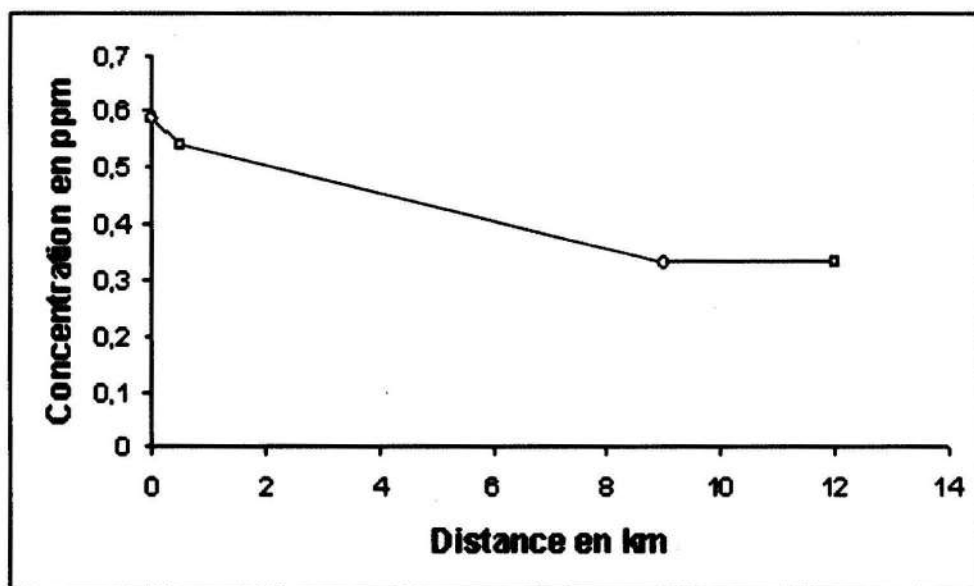


Fig. 3 - Evolution des valeurs du chrome dans le sol depuis le complexe sidérurgique jusqu'à la mer.

The evolution of chromium values in soil from the steel complex to the sea.

Au niveau des eaux superficielles et souterraines, le tableau II résume les paramètres statistiques des principales caractéristiques physico-chimiques déterminées à partir des prélèvements effectués en février 2005. 32 points d'eau ont été échantillonnés sur l'ensemble du sous bassin de l'oued Meboudja. La conductivité électrique des eaux présente des valeurs comprises entre $560 \mu\text{S.cm}^{-1}$ et $20000 \mu\text{S.cm}^{-1}$. Les valeurs les plus élevées correspondent aux eaux situées en bordure de l'oued, pour lesquelles les concentrations en chlorures peuvent atteindre 6000 mg.l^{-1} . Des teneurs élevées en chrome ($0,02\text{-}1,25 \text{ mg.l}^{-1}$) ont été également obtenues notamment autour du complexe sidérurgique et en bordure de l'oued Meboudja.

Deux types d'évaluation détaillée du risque (EDR) ont été envisagés dans cette étude. L'EDR santé où la concentration maximale (hypothèse conservatrice) du chrome mesurée

dans le sol a été utilisée. Pour l'EDR eau, ont été utilisées, à la fois, les teneurs du chrome dosées dans les eaux superficielles ($1,25 \text{ mg/l}$ au point de rejet et $0,06 \text{ mg/l}$ à la confluence Meboudja-Seybouse) et celles mesurées dans les puits captant la nappe superficielle.

Pour mieux apprécier les principaux traits de la qualité des eaux souterraines, les résultats des analyses ont été traités par une analyse en composantes principales (ACP) (fig. 4). L'axe 1, avec 32% de la variance totale, est expliqué par l'ensemble des éléments de la minéralisation ; conductivité, sulfate, calcium, magnésium, chlorure, sodium et strontium. L'axe 2, 15% de la variance, est expliqué, entre autres, par les nitrates, le chrome et l'étain. Le premier est due à l'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture et les deux autres sont liés aux rejets industriels dans l'oued Meboudja et au stockage des déchets directement sur le sol (Debièche et *al.*, 2001).

Tableau II - Statistiques élémentaires des résultats analytiques de l'échantillonnage des eaux de la nappe superficielle du mois de février 2005. Ds : écart type ; CE : conductivité électrique ; les teneurs chimiques en mg.l^{-1} .

Elementary statistics of analytical data of surface aquifer water samples of February 2005. Ds: standard deviation; CE: electric conductivity; chemical element contents in mg.l^{-1} .

Variables	Min	Max	Moy	Ds	Variable	Min	Max	Moy	Ds
T (°C)	19.8	25.7	22.9	1.64	NO_3	0	296	43.85	64.12
pH	6.88	8.4	7.4	0.31	NO_2	0.07	0.73	0.25	0.21
hE (mV)	238	416	356	32	PO_4	0.11	1.72	0.50	0.45
Si	4.2	12.2	7.16	1.95	NH_4	0	4.5	0.18	0.77
Ca	44	746	209	156	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	558	20333	3222	3592
Mg	12	495	78.5	94.3	Cr(T)	0.02	1.25	0.07	0.21
Na	35	3670	419.8	642.6	Mn	0	2.48	0.13	0.46
K	1	56	8.7	13.2	Fe(T)	0.01	2.81	0.22	0.61
Cl	48	6274	658	1148	Ni	0.02	0.55	0.1	0.10
SO_4	60	883	204	147	Sn	0	0.24	0.03	0.04
HCO_3	188	610	416	108	Al	0	0.06	0.02	0.01
F	0.05	1.62	0.62	0.40	Sr	0.3	6.8	1.5	1.3

IMPACTS DES REJETS INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DU MILIEU ET SUR LES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE.
CAS DE LA RÉGION D'ANNABA (ALGÉRIE)

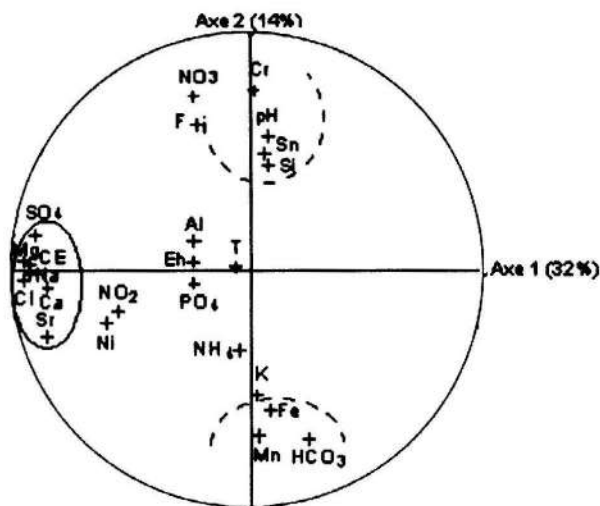


Fig. 4 - ACP appliquée aux eaux souterraines du sous bassin de la Meboudja – Cercle des variables

Principal component analysis applied to groundwater of the Meboudja lower basin – circle of variates.

1. Evaluation détaillée des risques sur la santé humaine

L'analyse des résultats obtenus démontre clairement que l'étendue de la gravité des problèmes environnementaux dans cette région, notamment la pollution par le chrome, affecte les eaux superficielles et souterraines et, par conséquence, la santé publique. L'évaluation des risques élaborée ici a pour objectifs de: (1) identifier les différents types de risques qui peuvent découler de la pollution; (2) quantifier ces risques; (3) définir les objectifs de réhabilitation pour mettre en conformité le site vis à vis de la réglementation sur l'environnement et (4) déterminer les actions qui vont réduire le risque pour le rendre acceptable (la stratégie de réhabilitation).

Toxicité du Chrome : Le métal lui-même n'est pas toxique, mais les sels de chrome trivalent et surtout l'acide chromique et ses sels sont des poisons. Le cation Cr^{3+} se fixe sur l'hémoglobine et les protéines du plasma (BRGM, 2000a). L'acide chromique, les bichromates et

les chromates attaquent la peau et les voies respiratoires, provoquant des ulcères, des dermatoses, de l'irritation chronique, de graves lésions telles que la perforation de la cloison nasale. Pour l'homme, la dose mortelle de bichromate de potassium, poison méthémoglobinisant, est de 0,25 à 0,30 g. Les chromates jouissent de propriétés bactéricides. Le chrome est également très dangereux lorsqu'il apparaît sous la forme hexavalente (Cr^{6+}), pouvant provoquer le cancer des poumons chez l'homme (BRGM, 2000b; BRGM, 2001).

Évaluation détaillée des risques du Chrome sur la santé humaine : Elle est basée sur:

(1) la définition des concentrations d'exposition où la première phase de l'analyse détaillée des risques consiste à estimer les concentrations du chrome présent dans le site aux différents points d'exposition (la concentration employée est la concentration moyenne observée dans les sols qui est égale à 658 mg /kg);

(2) l'estimation des doses d'exposition où la dose journalière d'exposition (DJE) est la dose de substance reçue par l'organisme rapportée au poids de l'individu et au nombre de jours d'exposition. Elle a pour but de définir une quantité de polluant administrée, exprimée en mg/kg/j. Le calcul de la DJE pour les différents scénarios d'exposition se déroule toujours en appliquant les mêmes équations adaptées pour chacune des voies d'exposition. Ces équations se présentent de la manière suivante (US-EPA, 1989 ; ASTM-RBCA, 1998 ; CARACAS, 1998):

$$DJE = \frac{C \times Q \times Fsp \times De \times Fe}{P \times t}$$

avec :

C : concentration dans le milieu d'exposition (mg/ kg).

Q : quantité ingérée (kg).

Fsp : facteur d'absorption.

De : durée d'exposition (années).

Fe : fréquence d'exposition (j / an).

P : poids de l'individu (Kg).

t : période de temps sur la quelle l'exposition est moyennée (jours).

La dose journalière acceptable (DJA) est la quantité de substance chimique que peut ingérer un homme par jour, au cours de sa vie, sans aucun risque appréciable pour sa santé.

Estimation du risque : Elle est différente en fonction de la substance qui peut être cancérigène ou non cancérigène. L'estimation du risque non cancérigène est exprimée par le rapport entre la dose journalière d'exposition et la dose journalière acceptable. Le rapport est appelé indice de risque IR.

$$IR = DJE / DJA$$

Si IR est inférieur à 1, alors le risque toxique est considéré comme acceptable.

Le risque cancérigène est estimé par la notion d'excès de risque individuel (ERI) qui est obtenu par multiplication de la dose journalière d'exposition par l'excès de risque unitaire (ERU); soit une probabilité d'attraper un cancer de 1 sur 1 million comme niveau de risque certainement acceptable. Si par contre la valeur atteint 10^{-4} le risque sera considéré comme

certainement inacceptable en terme de santé publique.

Le travail a concerné uniquement les personnes (près de 8000 employés) qui travaillent sur le site (fig. 5). Le tableau III a été élaboré sur la base des trois scénarios envisagés. Compte tenu des caractéristiques cancérigènes du chrome, il est nécessaire d'estimer l'excès de risque individuel (ERI) selon la relation :

$$ERI = 0,007 \times 4 \cdot 10^{-2} = 2,8 \cdot 10^{-4}$$

La valeur étant supérieure à 10^{-5} , le risque est inacceptable.

2. Évaluation détaillée des risques sur les eaux souterraines : Modélisation des écoulements souterrains et du transport de masse

La contamination des eaux souterraines est régie par les mécanismes de transport de masse. Ces processus déterminent l'ampleur de la diffusion du polluant et la distribution géométrique de la substance polluante. L'advection est de loin le mécanisme le plus dominant dans la migration de contaminant. La dispersion hydrodynamique est habituellement un processus de second degré. L'importance et la direction du transport advectif sont régies par la

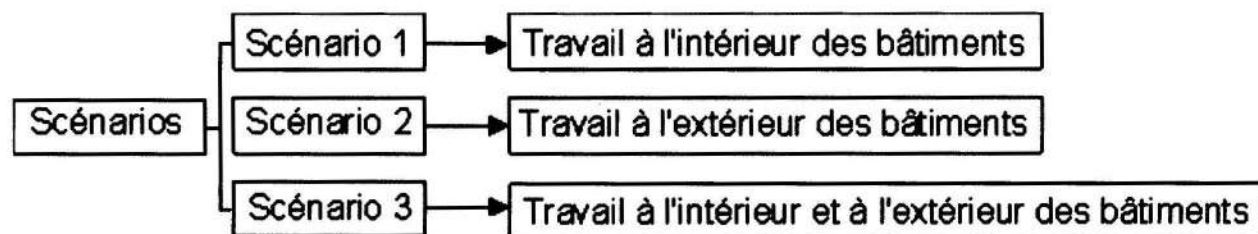


Fig. 5 - Les différents scénarios envisagés

Different envisaged scenarios.

IMPACTS DES REJETS INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DU MILIEU ET SUR LES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE.
CAS DE LA RÉGION D'ANNABA (ALGÉRIE)

Tableau III - Scénarios et résultats de l'évaluation des risques.
Scenarios and results of the evaluation of the risks evaluations.

Scénarios	Voies de Transfert	Milieux d'exposition	Cibles	Indice risque IR	Observation
Travail A l'intérieur des bâtiments	Inhalation de poussière en suspension	Air	Adultes	$7,56 \cdot 10^{-3}$	$0,007 < 1$ Risque acceptable
Indice de risque total du scénario 1				0,007	
Travail A l'extérieur des bâtiments	Contact Cutané	Sol pollué	Adultes	1,41	$4,29 > 1$ Risque inacceptable
	Ingestion	Sol pollué	Adultes	0,007	
	Inhalation	Air	Adultes	2,88	
Indice de risque total du scénario 2				4,29	
Travail mixte	Contact cutané	Sol pollué	Adultes	1,41	$0,007 \text{ à } 4,29$ Risque inacceptable
	Ingestion	Sol pollué	Adultes	0,007	
	Inhalation	Air	Adultes	2,88	
Indice de risque total du scénario 3				$0,007 - 4,29$	

configuration de l'aquifère ou de la surface piézométrique, les conditions aux limites, la distribution des perméabilités, etc. La distribution des écoulements souterrains est donnée par la solution de l'équation de diffusivité en trois dimensions (Bear, 1972) :

$$\frac{\partial}{\partial \chi_i} \left[K_{ii} \frac{\partial h}{\partial \chi_i} \right] + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

où S_s représente le coefficient d'emménagement spécifique du milieu poreux; K_{ii} : la composante principale du tenseur de perméabilité; h : la charge hydraulique; χ_i : la distance selon les coordonnées cartésiennes; t : le temps;

Alors que l'équation du transport de masse s'écrit (Javandel et al., 1984; Grove et Stollenwerk, 1984) :

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \chi_i} \left[D_{ij} \frac{\partial C}{\partial \chi_j} \right] - \frac{\partial}{\partial \chi_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right)$$

R représente le facteur de retard qui peut être défini par la relation suivante :

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C}$$

où C : la concentration du contaminant dans les eaux souterraines; t : le temps; χ_i : la distance selon les coordonnées cartésiennes; D_i : le coefficient de dispersion hydrodynamique; v_i : l'infiltration ou la vitesse de l'eau dans les pores; q_s : flux de l'eau par unité de volume de l'aquifère représenté par une injection (positif) ou un prélèvement (négatif); C_s : la concentration de l'eau injectée ou prélevée; θ : la porosité du milieu poreux; $\bar{C}$: la concentration des contaminants absorbés par le milieu poreux; λ : la constante de premier ordre (réactions); ρ_b : la densité du milieu poreux.

Schématisation des mécanismes d'écoulement et de transport : Plusieurs pompes d'essai ont été réalisés pour identifier les

caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. La transmissivité varie de 10^{-6} et $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Les perméabilités oscillent autour 10^{-4} m s^{-1} , les valeurs les plus élevées sont localisées au voisinage des oueds Meboudja et Seybouse ce qui, par conséquent, peut favoriser les interactions oued-nappe. Les eaux de surface de l'oued Meboudja, véhiculant une quantité importante de polluants, peuvent s'infiltrer et souiller les eaux souterraines. L'examen des données physico-chimiques montre que le processus le plus important qui régit le transport de masse dans les eaux souterraines est l'advection. La dispersion longitudinale est relativement significative, par contre la dispersion transversale pourrait être négligée. La concentration en chrome a été choisie pour une étude détaillée du risque sur les ressources en eau à l'aide du modèle de transport parce que: (a) elle a montré une évolution régulière des concentrations entre 1,25-0,06 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ le long du parcours de l'oued Meboudja; et (b) les concentrations en chrome dans les eaux souterraines sont uniformes et oscillent en général autour de 0.02 mg l^{-1} . Les données introduites dans le modèle peuvent être résumées comme suit :

- les rejets dans l'oued Meboudja sont pris en considération en tenant compte des concentrations mesurées en différents points de mesure dans l'oued, de l'usine jusqu'à sa confluence avec l'oued Seybouse;
- les limites du modèle correspondent approximativement aux limites du sous bassin versant de l'oued Meboudja;
- la recharge pluviale se produit verticalement à partir de la surface du sol;
- les pompages en continu effectués dans les ouvrages captant la nappe superficielle ont provoqué un appel d'eau de l'oued Meboudja en particulier dans les secteurs de Sidi-Amar;
- dans certains secteurs la concentration en chrome des eaux souterraines est presque

identique à celle des eaux de surface, en particulier le cas du secteur de Pont Bouchet;

- les rejets dans l'oued Meboudja ont été considérés comme une source de pollution diffuse tout au long de son parcours jusqu'à la confluence avec la Seybouse.

Modèle des écoulements souterrains:

Pour résoudre les équations de transport de masse, le modèle utilise les approximations de l'équation d'advection-dispersion. Il s'agit ensuite d'affecter des conditions aux limites en assignant des concentrations sur toutes les mailles de bordure du domaine discrétisé. L'infiltration à partir de l'oued Meboudja a été simulée en assignant une recharge additionnelle au modèle. Une concentration constante a été affectée en différentes sections de l'oued Meboudja en tenant compte de la distribution géographique des concentrations obtenues dans les eaux souterraines lors des campagnes de prélèvements. Les relevés piézométriques de février 1999 ont été utilisés pour résoudre l'équation d'écoulement en régime permanent. Le champ des vitesses obtenu est utilisé pour la simulation du transport de masse pour chacun des essais réalisés.

Le domaine discrétisé comporte 40 lignes et 40 colonnes de 200 m de côté sur une seule couche (nappe superficielle) couvrant un domaine de 8000 x 8000 m. La couche étudiée est contenue dans les alluvions de 10 à 15 m d'épaisseur le long de l'oued Meboudja. La recharge de la nappe est estimée à 100 mm par an. L'infiltration continue des rejets de l'oued Meboudja a été assignée en tant que recharge additionnelle dans le modèle. La première étape du modèle est la simulation des écoulements souterrains. La répartition des lignes de courant et par conséquent le champ des vitesses n'est pas affecté par la migration du polluant car la densité et la viscosité des eaux souterraines polluées est presque identique à celles des eaux non contaminées dans le secteur. L'équation d'écoulement

IMPACTS DES REJETS INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DU MILIEU ET SUR LES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE.
CAS DE LA RÉGION D'ANNABA (ALGÉRIE)

ment est donc résolue indépendamment de l'équation de transport de masse. De plus, les relevés piézométriques dans le secteur indiquent que les gradients hydrauliques ne changent pas de manière significative avec le temps. On peut donc considérer que l'écoulement souterrain est en état d'équilibre et les lignes de courant ont été calculées par Visual MODFLOW (Guiger et Frantz, 1996) utilisant le Pack Slice Successive Over Relaxation (SSOR) (McDonald and Harbaugh, 1988). Le calage du modèle d'écoulement a été effectué par un simple procédé manuel d'essai-erreur jusqu'à l'obtention d'une superposition correcte des données mesurées et

calculées (fig. 6). Les critères employés pour juger de la fiabilité des résultats sont l'erreur moyenne, l'erreur moyenne absolue et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne calculée sur 10 puits d'observation. Les valeurs obtenues sont respectivement de -0,14; 3,2 et 3,6 m.

Modèle de transport de masse: Le modèle MT3D (Zheng, 1990) a été utilisé pour la simulation de transport de masse dans la nappe (convection, dispersion et réactions chimiques). Ce modèle est en prise directe avec le logiciel MODFLOW de l'United States Geological Survey (USGS) qui prend en charge la modélisa-

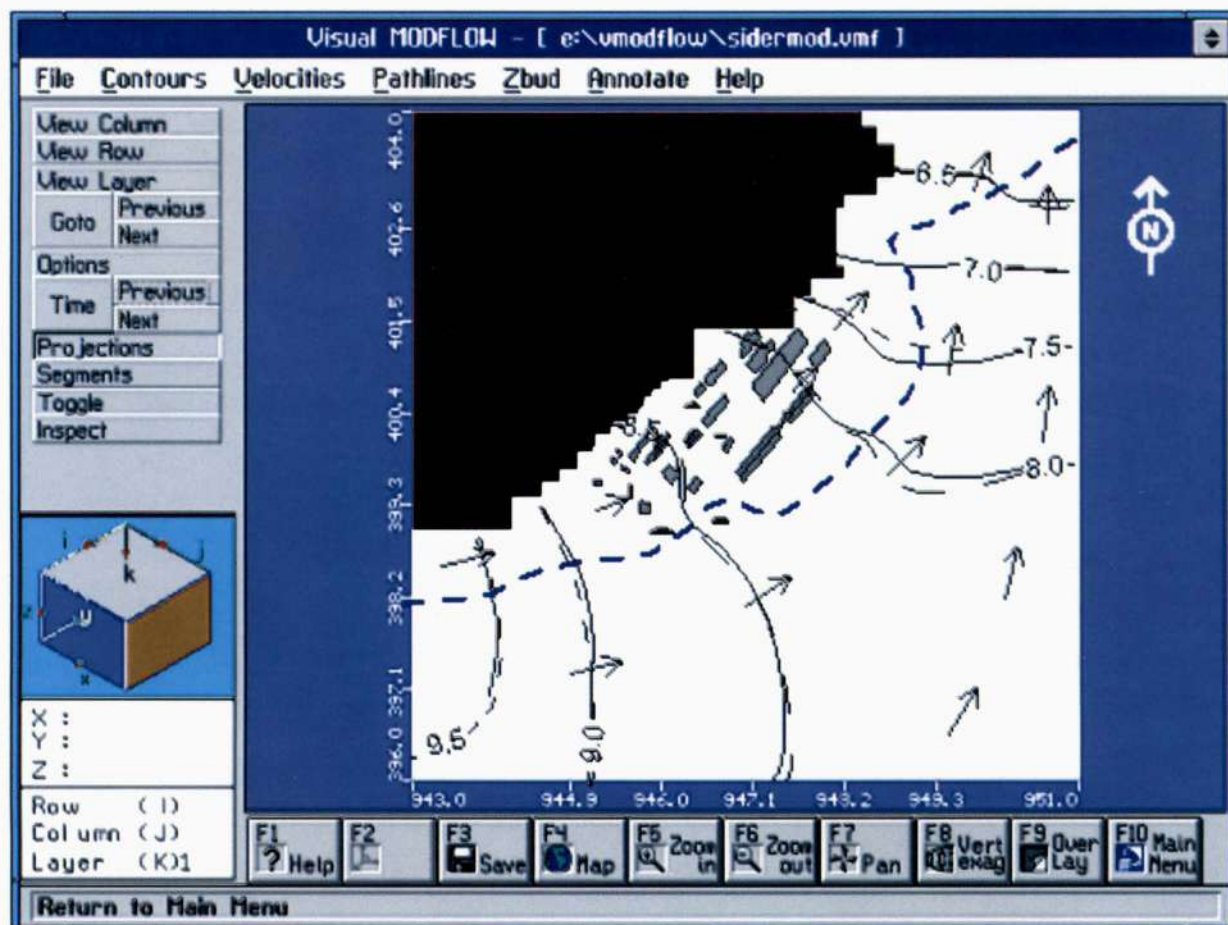


Fig. 6 - Cartes piézométriques de la nappe superficielle du mois de février 2005. Flèches : lignes de courant ; lignes en tiretées : courbes simulées; lignes continues : courbes mesurées. Equidistance : 0.5 m.

Piezometric maps of the water table aquifer of february 2005. Arrows: flow lines; dashed lines: simulated curves; solid lines: measured curves; equidistance: 0.5 m.

tion des écoulements souterrains en différences finies. Les valeurs de dispersivité dans les directions x , y et z sont prises égales respectivement à 10, 1 et 0,1 m (Kimbrough et al., 1999; Domenico et Schwartz, 1990; Tevissen, 1993). La tendance pour que a_L soit environ 10 fois plus grande que a_T et 100 fois a_z est en conformité avec les concentrations observées dans le secteur. La concentration initiale en chrome assignée dans le reste du secteur est d'environ 0.02 mg.l⁻¹. La diminution progressive des concentrations en chrome en s'éloignant de l'oued Meboudja traduit une recharge relative-

ment constante du polluant à partir de l'oued. Ainsi, une concentration constante en chrome a été assignée aux différents noeuds de l'oued Meboudja, avec une valeur de 1.25 mg.l⁻¹ à la source (au niveau des rejets de l'usine Mittal steel) près du Sidi Amar et 0.06 mg.l⁻¹ au niveau de sa confluence avec l'oued Seybouse. Les courbes d'égales concentrations établies pour l'année 2005 (fig. 7) indiquent que les particules suivent le sens d'écoulement traduisant la prédominance du processus d'advection dans la migration du polluant.

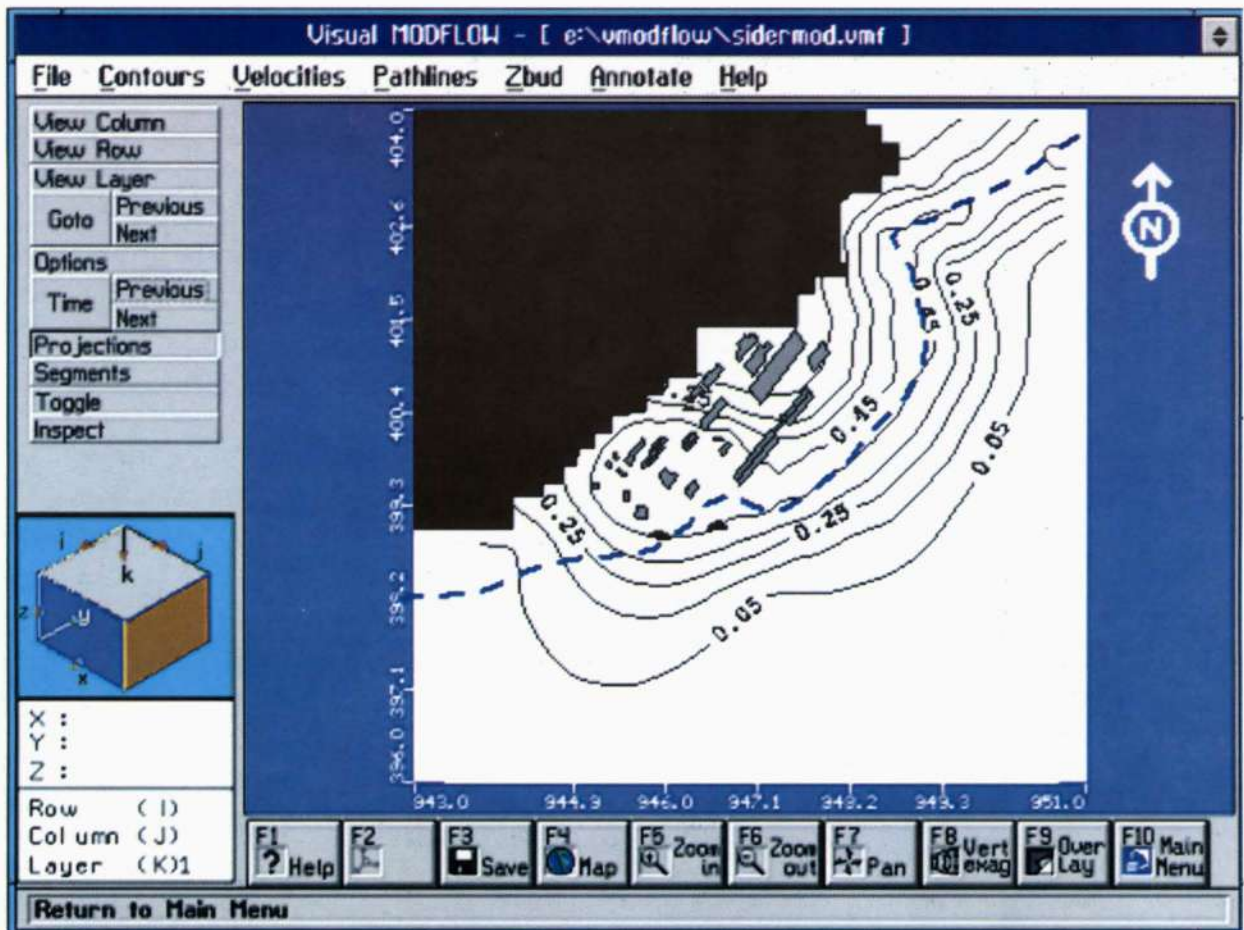


Fig. 7 - Concentrations en chrome (mg.l⁻¹) dans la nappe superficielle du sous bassin de la Meboudja calculées par le modèle pour le mois de février 2005

Chromium contents (mg.l⁻¹) in the water table aquifer of the Meboudja lower basin computed by the model for february 2005.

IMPACTS DES REJETS INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DU MILIEU ET SUR LES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE.
CAS DE LA RÉGION D'ANNABA (ALGÉRIE)

La migration des polluants liés aux rejets dans l'oued Meboudja a pu être identifiée pour la période allant de 1999 à 2005. La propagation du chrome, pendant les 6 dernières années, s'étend sur une largeur de près de 600 m de part et d'autre de l'oued Meboudja (fig. 7). Les écarts entre les concentrations calculées et mesurées sont vraisemblablement dues aux hypothèses relatives: (1) aux pompages considérés comme uniforme sur l'ensemble des puits, et (2) à la concentration affectée à l'ensemble des nœuds de l'oued Meboudja considérée comme étant une source diffuse, ce qui est difficile à identifier compte tenu de la complexité des interactions entre l'oued et la nappe.

3. Développement du modèle conceptuel et du diagramme d'exposition

Les données acquises sur la contamination des sols et des eaux superficielles et souterraines ont été utilisées pour élaborer le schéma conceptuel et pour identifier les différents scénarios d'exposition selon la terminologie utilisée pour l'évaluation des risques (US-EPA, 1989; ASTM-RBCA, 1998; CARACAS, 1998). La combinaison des résultats de l'étude hydrogéologique et ceux de l'analyse des données physico-chimiques du sol et des eaux souterraines a permis d'obtenir le modèle hydrogéologique conceptuel de la figure 8. Cette figure récapitule l'ensemble des informations relatives à l'hydrogéologie du sec-

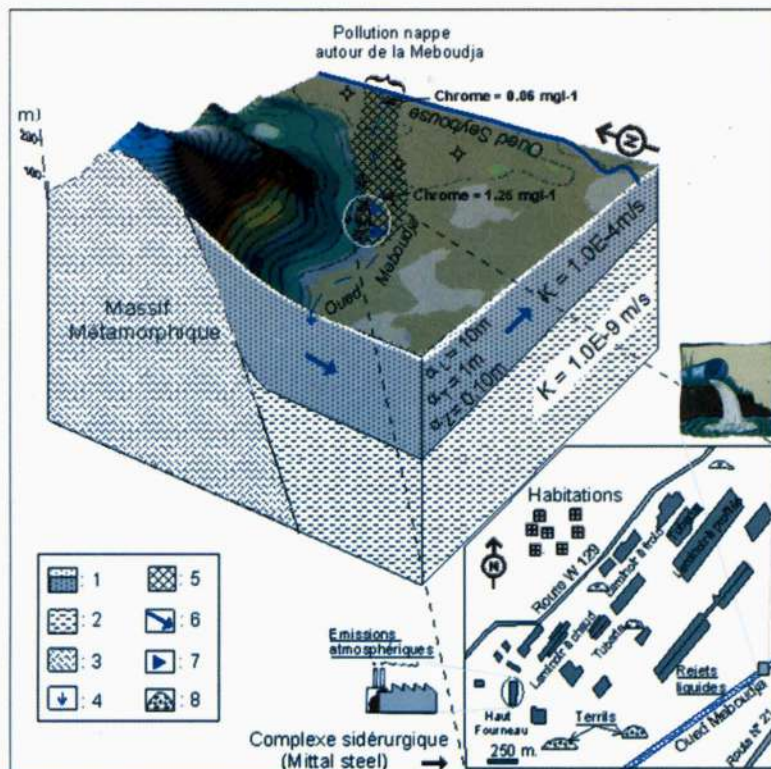


Fig. 8 - Schéma conceptuel du site pollué du sous bassin de la Meboudja montrant l'évolution du Cr dans les eaux de surface depuis la source jusqu'à la confluence avec la Seybouse.

Conceptual sketch of the Meboudja lower basin polluted site. Showing the chromium evolution in the water surface from the spring to the confluence with Seybouse.

1 : alluvions (haut : zone non saturée, bas : zone saturée) (*alluvium (upper part: vadose zone, lower part: saturated zone)*), 2 : argiles (*clay*), 3 : formations métamorphiques (*metamorphic formations*), 4 : infiltration (*infiltration*), 5 : nappe polluée (*polluted aquifer*), 6 : écoulement souterrain (*groundwater flow*), 7 : rejets industriels (*industrial rejects*), 8 : déchets industriels (terris) (*industrial wastes (tips)*).

teur étudié et à l'extension de la contamination des eaux. L'examen de la figure 8 permet de faire les constatations suivantes : (a) la contamination par les métaux lourds du sol à proximité du complexe industriel induite par le stockage des déchets directement sur le sol; et (b) la percolation des contaminants véhiculés par les déchets lessivés par les précipitations et par les eaux de surface (source primaire d'exposition) pour atteindre le sol environnant (source secondaire d'exposition) et la nappe superficielle. Les résultats expérimentaux de ce travail mettent en évidence des interactions assez marquées entre l'oued Meboudja et la nappe.

Finalement, les résultats obtenus ont été utilisés pour élaborer le diagramme d'exposition (ASTM-RBCA, 1998) donné sur la figure 9, qui montre que les milieux récepteurs (humain, faune, écosystème de l'oued) sont touchés par les mécanismes primaires et secondaires de transport de polluants. Les voies de transfert sont l'inhalation des substances volatiles et du contact direct avec le sol (ingestion et contact cutané)

qui pourrait menacer les populations et la faune environnantes ou même lointaines. Par ailleurs, les eaux souterraines présentent également un risque potentiel particulièrement pour l'écosystème des oueds Meboudja, Seybouse, la mer méditerranée et pour les captages d'eau pour l'irrigation et pour l'alimentation du bétail.

VI. CONCLUSION

La présente étude se rapporte à un cas de pollution du sol, de l'air et des eaux superficielles et souterraines engendrée par le stockage des déchets industriels directement sur le sol et par les rejets non contrôlés d'effluents industriels dans le milieu récepteur.

L'évaluation détaillée des risques sur la santé des travailleurs du complexe sidérurgique «Mittal steel» montre que ce sont surtout l'inhalation et le contact dermique qui présentent les risques les plus élevés pour les travailleurs à l'extérieur des bâtiments. Le risque cancérogène par inhalation du chrome est supérieur à la probabilité

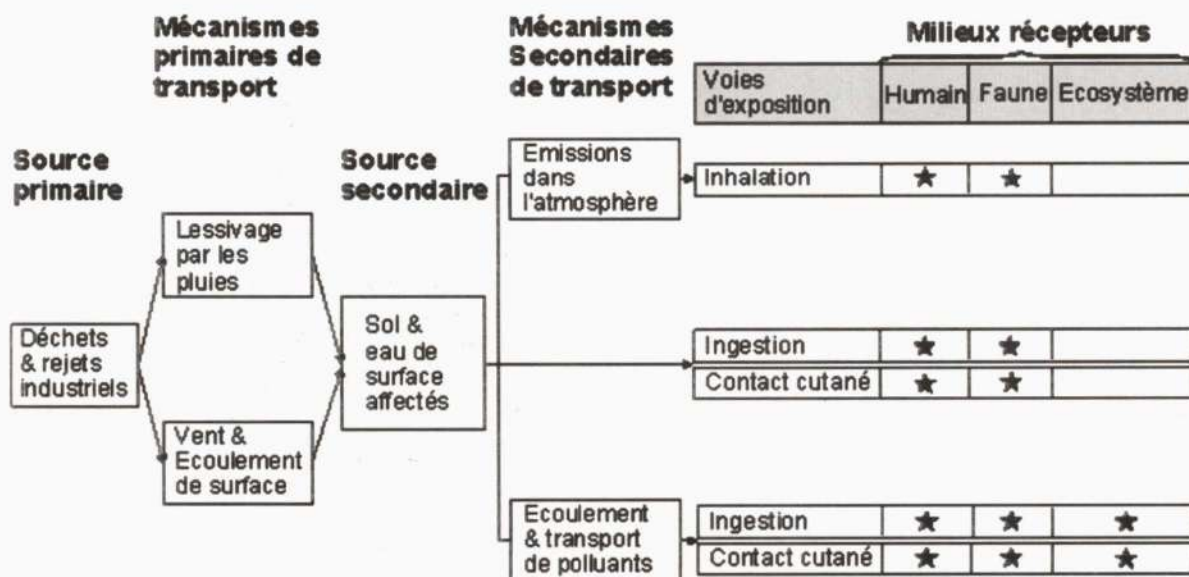


Fig. 9 - Diagramme des expositions du site pollué du sous bassin de la Meboudja.

Diagram showing the polluted site exposures of the Meboudja lower basin.

IMPACTS DES REJETS INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DU MILIEU ET SUR LES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE.
CAS DE LA RÉGION D'ANNABA (ALGÉRIE)

qu'il y ait une personne sur 100 000 habitants qui soit atteinte par le cancer.

La pollution des eaux souterraines s'étale latéralement sur une bande de 500-600 m de part et d'autre de l'oued Meboudja. Cette dernière reçoit en effet les effluents industriels dans le secteur de Sidi-Amar où elle est en relation hydraulique avec les alluvions perméables. La propagation de la pollution est facilitée par les prélèvements effectués dans les puits pour les besoins en eau pour l'irrigation et pour les besoins des nombreuses unités industrielles implantées dans le secteur de Sidi Amar - El Hadjar. La modélisation des écoulements souterrains et de transport de masse a permis de mieux comprendre les interactions oued-nappe et d'évaluer la migration du contaminant. En effet la modélisation a montré que le polluant suit les lignes de courant (transport convectif) alors que la diffusion transversale est négligeable.

Remerciements : Ce travail a été financé par les projets MATE 137 et Tassili 05HCU003. Nous tenons à remercier Mme D. Khader pour les analyses chimiques. Les Professeurs El Achheb Abderrahim et Toubal Ahmed Cherif, reviewers du manuscrit, sont également remerciés pour les corrections et les commentaires apportés.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR (ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION), 2005.** Evaluation de la qualité des sols : Volume 1 : Méthodes d'analyse chimique ; Volume 2 : Méthodes d'analyses physique et biologique. 1^{ère} édition, Paris, 946 p.
- AHMED SAÏD, Y., LEAKE, B. E. AND ROGERS, G. 1993.** The petrology, geochemistry and petrogenesis of the Edough igneous rocks, Annaba, NE Algeria. *Journal of African Earth Science*, 17, (n°1), pp.111-123.
- A.S.T.M. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS), 1998.** Standard Provisional Guide for Risk-Based Corrective Action. PS 104-98. ASTM, Philadelphia.
- BEAR, J. 1972.** Dynamics of Fluids in Porous Media. New York, American Elsevier, pp. 764.
- B.R.G.M. (BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRE), 2000a.** Gestion des sites (potentiellement pollués). Visite préliminaire. Diagnostic initial. Evaluations simplifiées des risques. BRGM éditions – Version 2. 29p.
- B.R.G.M. (BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRE), 2000b.** Gestion des sites pollués. Diagnostic approfondi. Evaluations détaillées des risques. BRGM éditions – Version 0. 30p.
- B.R.G.M. (BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRE), 2001.** Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes. Document BRGM, 300. 119p.
- BRUNNEL, M., HAMMOR, D., MISSE, M., GLEIZES, G. ET BOULETON, J. 1988.** Cisaillements syn-métamorphes avec transport vers le Nord-Ouest dans le massif cristallin de l'Edough (Est algérien). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 306, pp. 1039-1045.
- CARACAS, 1998.** Risk Assessment for Contaminant Sites in Europe, Vol. 1-Scientific Basis. LQM Press, Nottingham.
- DEBIECHE, T.H., MANIA, J. ET MUDRY, J. 2001.** Pollution d'une nappe alluviale par le chrome et l'étain à partir d'un stockage de résidus métallurgiques: Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-Est algérien. *Africa Geosciences Review*, Vol. 8, N°4, pp. 425-435.
- DEBIECHE, T.H. 2002.** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Thèse Doct., Univ. Franche-Comté, 199p.
- DJABRI, L. 1996.** Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse Doctorat Es Sciences, Université de Annaba, 261p.
- DJABRI, L., HANI, A., LAOUAR, R., MANIA, J., MUDRY, J. AND LOUHI, A. 2003.** Potential pollution of groundwater in the valley of the Seybouse River, north-eastern, Algeria. *Environmental Geology*, vol. 44, n° 6, pp. 738-744.

- DOMENICO, P. A. AND SCHWARTZ, F.W. 1990.** Physical and Chemical Hydrogeology. *John Wiley and Sons, U.S.A.*, pp. 824.
- GLEIZES, G., BOULETON, J., BOSSIÈRE, G. ET COLLOMB, P. 1988.** Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est algérien). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 306 (II), pp. 1001-1008.
- GROVE, D.B. AND STOLLENWERK, K.G. 1984.** Computer Model of One-Dimensional Equilibrium Controlled Sorption Processes. *U.S. Geol. Survey Resources Investigations Report 84-4059*, pp. 58.
- GUIGER, N. AND FRANTZ, T. 1996.** Visual MODFLOW: Users Guide, *Waterloo Hydrogeologic, Waterloo, Ontario, Canada*.
- HAMMOR, D. ET LANCELOT, J. 1998.** Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le massif de l'Edough (Nord-Est de l'Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 327, série II, pp. 391-396.
- HANI, A. 2003.** Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. *Thèse de Doctorat Es Sciences, Université de Annaba*, 214p.
- HANI, A., MANIA, J., DJABRI, L. ET MUDRY, J. 2003.** Identification des apports latéraux et de drainance à partir des réponses chimiques et isotopiques : cas du système aquifère Annaba-Bouteldja. *Africa Geosciences Review*, vol. 10, n° 3, pp. 267-280.
- HILLY, J. 1962.** Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est constantinois). *Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie (nouvelle série)*, 19, 408p.
- ILAVSKY, J. ET SNOBKOVÁ, P. 1987.** Découverte d'acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 305, pp. 881-884.
- JAVANDEL, I., DOUGHTY, C. AND TSANG, C.F. 1984.** Groundwater Transport: Handbook of Mathematical Models, American Geophysical Union, *Water Resources Monograph 10*, pp. 228.
- KHERICI, N. 1993.** Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba- la Maffragh, NE algérien). *Thèse de Doct. Es Sci., Univ. de Annaba*, 170p.
- KIMBROUGH, D.E., COHEN, Y., WINER, A.M., CREELMAN, L. AND MABUNI, C. 1999.** A critical assessment of chromium in the environment. *Critical Review in Environmental Science and Technology*, 29, 1, pp. 1-46.
- LAOUAR, R., BOYCE, A.J., AHMED-SAÏD, Y., OUABADI, A., FALICK, A.E., AND TOUBAL, A. 2002.** Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, northeast Algeria. *Journal of African Earth Sciences*, 35, pp. 271-283.
- LOUHI, A. 1997.** Pollution des eaux et sols. Cas de la région de Annaba. Etude des interférences et dosage Al, Fe, Zn, Ni, Cr, Pb, Sn et Hg par spectrométrie d'émission Plasma-ARC (DCP-AES), absorption atomique (SAA) et spectrophotométrie UV/VIS. *Thèse de Doct. Es Sci., Univ. de Annaba*, 167p.
- MCDONALD, J. M. AND HARBAUGH, A.W. 1988.** A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. *Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geol. Survey Book*, 6, pp. 586.
- RODIER, J. 1996.** L'analyse de l'eau. 8^{ème} édition, *Dunod*. 1384 p.
- TEVISSSEN, E. 1993.** Méthodologie d'étude et modélisation du transport de solutés en milieux poreux naturels. Application à la migration du chrome dans la nappe alluviale du Drac (Isère). *Thèse de Doctorat INPL, Nancy*, 150p.
- TOUBAL, A. C. 1998.** Approche géophysique des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrain. Exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et de la Baie d'Alger. *Thèse de Doctorat d'Etat, U.S.T.H.B.*, 226p.

IMPACTS DES REJETS INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DU MILIEU ET SUR LES EAUX DE LA NAPPE SUPERFICIELLE.
CAS DE LA RÉGION D'ANNABA (ALGÉRIE)

- US EPA, 1989.** Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. 1, Human Health Evaluation Manual (EPA/1-89/002). *USEPA, Washington, DC.*
- ZENATI, N. 1999.** Relation nappe-lac, confirmation par l'hydrochimie. Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El-Hadjar, lac Fetzara, N.E. algérien. *Mémoire Magistère, Université de Annaba*, 148p.
- ZHENG, C. 1990.** MT3D, a Modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater system prepared for the U.S. Environmental Protection Agency.